

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 28	str. 23-38	Zagreb, 2014.
----------------------------------	---------	------------	---------------

UDK 553.98:519.24 (497.5)
UDC 553.98:519.24 (497.5)

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

Language/Jezik: Hrvatski/Croatian

UTVRĐIVANJE SEKVENCIJSKIM INDIKATORSKIM METODAMA SLABOPROPUSNIH LITOFACIJESA KAO VRSTE NEKONVENCIONALNIH LEŽIŠTA UGLJIKOVODIKA NA PRIMJERU POLJA KLOŠTAR

DETERMINATION OF LOW PERMEABLE LITHOFACIES, AS TYPE OF UNCONVENTIONAL HYDROCARBON RESERVOIRS, USING SEQUENTIAL INDICATOR METHODS, CASE STUDY FROM THE KLOŠTAR FIELD

KRISTINA NOVAK ZELENIKA¹, TOMISLAV MALVIĆ^{1,2}

¹INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i upravljanje ležištima, Šubićeva 29, 10000 Zagreb

e-mail: kristina.novakzelenika@ina.hr, tomislav.malvic@ina.hr

²Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: prijelazni litofacijesi, ležišta ugljikovodika, neogen, Savska depresija, Hrvatska.

Key words: transitional lithofacies, hydrocarbon reservoirs, Neogene, Sava Depression, Croatia

Sažetak

Geostatističke metode uspješno su uporabljene prilikom izradbe taložnoga modela na strukturi Kloštar za vrijeme gornjega miocena (donjega pontja). Zajedničkim promatranjem dviju varijabli (šupljikavosti i debljine), na odabranim graničnim vrijednostima, dobio se uvid u položaj glavnoga taložnog kanala, postojanje litofacijskih prijelaza, smjer donosa detritusa, te prostornu razdiobu varijabli unutar reprezentativnog donjo-pontskog ležišta. Na razini analizirane strukture lako je moguće opaziti smjerove donosa turbidita, ali i ulogu rubnoga rasjeda u usmjeravanju detritusa. Mjesta najvećih debljina bila su ona na kojima se naizmjenično odvijala značajna turbiditna sedimentacija i bazensko pelitno taloženje. Sekvencijske indikatorske simulacije istakle su karte šupljikavosti kao primarni, a karte debljina sekundarni (dopunski) izvor podataka.

Abstract

Geostatistical methods are very successfully used in Upper Miocene (Lower Pontian) Kloštar structure modelling. Mapping of the two variables (porosity and thickness) and their common observation in certain cut-off values gave the insight in depositional channel location, transitional lithofacies, material transport direction and variables distribution within representative Lower Pontian reservoir. It was possible to observe direction of the turbidites and role of the normal fault in detritus flow direction in the analyzed structure. Intercalation between turbiditic sandstones and basinal pelitic marls were the locations with the highest thicknesses. Sequential Indicator Simulations highlighted porosity maps as primary and thickness maps as secondary (additional) data source.

1. Uvod

U ne tako davnoj povijesti istraživanja ležišta ugljikovodika naftnogeološki sustavi prikazivali su se kao homogeni, iako se i tada znalo da to oni nikako nisu. Homogenost sustava svakako olakšava i pojednostavnjuje vrlo složenu sliku podzemlja, no s alatima koji su prije bili dostupni geolozima takva heterogenost i složenost teško se mogla prikazati ili opisati. No, kako tehnika i tehnologija svakim danom sve više napreduju, suvremene metode, posebno u geologiji istraživanja ugljikovodika, omogućavaju složene geološke sustave prikazati kao heterogene jer oni to i jesu. Prijelazne slabopropusne litofacijese unutar njih danas je moguće uspješno kartirati i izdvojiti geostatističkim metodama. To je vrlo važno

posebno ako se uzme u obzir da gotovo svako «konvencionalno» ležište sadrži takve litofacijese s određenim zasićenjima ugljikovodicima.

Jedan od preduvjeta korištenja geostatističkih metoda je dovoljno velik broj ulaznih podataka. Teško je reći koji je minimalan broj podataka dovoljan, no prema nekim autorima (npr. MALVIĆ, 2008) broj podataka ne bi smio biti manji od 10 ili 15 u jako anizotropnim sustavima. U razradbi ležišta, kada postoji dovoljno veliki broj bušotina, taj preduvjet može biti zadovoljen.

U ovome radu je dan primjer kartiranja litofacijsa polja Kloštar sekvencijskim indikatorskim simulacijama (SIS). Općenito, stohastičke realizacije omogućuju da se za isti ulazni set podataka dobiju različita rješenja koja mogu biti slična. međutim niti

jedno nije identično. Ono što karakterizira takva rješenja je njihova jednaka vjerojatnost. Kartiranje litofacijesa načinjeno je pomoću dvije varijable (šupljikavost i debljina) donjopontskog ležišta.

Polje Kloštar je smješteno oko 55 km istočno od Zagreba na zapadnim obroncima Moslavačke gore, na nadmorskoj visini od 110 do 180 m, a u naftno-geološkom smislu pripada Savskoj depresiji (slika 1).



Slika 1. Lokacija polja Kloštar (VELIĆ et al., 2008)

Figure 1. Location map of the Kloštar Field (VELIĆ et al., 2008)

2. Razvoj strukture Kloštar tijekom neogena i kvartara

Početak oblikovanja Savske depresije smješta se u donji miocen, kada su prema RÖGLU (1996, 1998) marinski prostori u otnangu i karpatu smješteni uglavnom na zapadu u području Hrvatskog zagorja

Murske depresije, dok se slatkovodni prostori nalaze istočno od njih. Marinska transgresija nastupila je (ČORIĆ et al., 2009) u srednjem miocenu, tj. donjem badenu (baden, 16,4-13,0 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998). Razvoj marinskih, a kasnije drugih taložnih okoliša nastavio se tijekom gornjeg miocena, pliocena te završno pleistocena i holocena (tablica 1).

Tablica 1. Vrijeme trajanja pojedinih kronostratigrafskih jedinica, razdoblja oblikovanja hrvatskog dijela Panonskog bazena te dominantni mehanizmi transporta i taloženja materijala (MALVIĆ & VELIĆ, 2011)

Table 1. Time interval of particular chronostratigraphic units, periods of evolution of the Croatian part of Pannonian Basin System and dominant transport and depositional processes (MALVIĆ & VELIĆ, 2011)

starost u milijunima godina																			
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
otnang		kar-pat	baden			sarmat		panon				pont		dacij, romanij			pleistocen, holocen		
								rani		kasni		rani	kasni						
moguća djelomična ekstenzija			prva transtenzijska faza			prva transpresijska faza		druga transtenzijska faza					druga transpresijska faza						
			lokalno trošenje stijena s kopna i mehanizam donosa aluvijalnim lepezama			oplićavanje i smanjenje saliniteta		udaljeni klastični izvor materijala i mehanizam donosa turbiditnim strujama					završno strukturno oblikovanje, migracija ugljikovodika, kontinentalni okoliši						

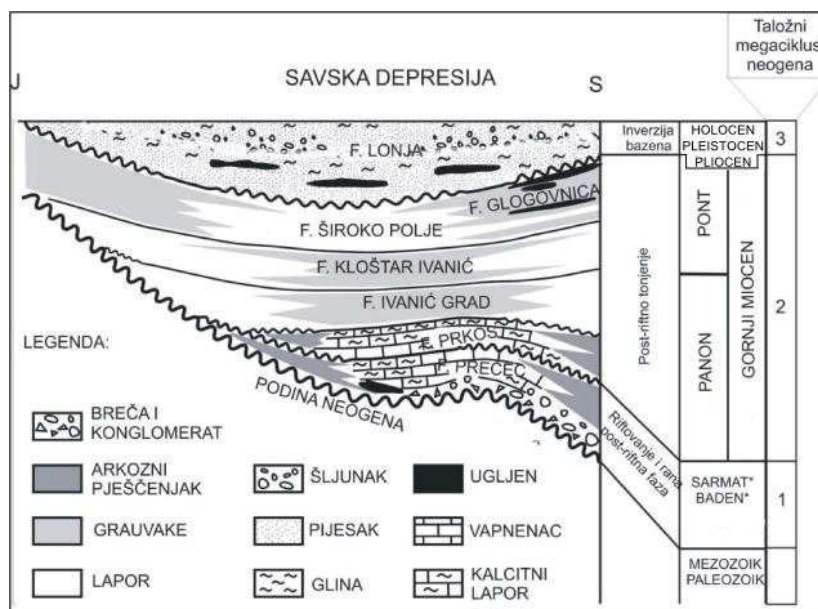
Naslage miocena, zaključno sa sarmatom, pripadaju formaciji Prečec (ŠIMON, 1980), kada su tijekom transtenzije obalni dijelovi uglavnom bili vezani uz "otočne gore", tj. paleo-Medvednicu, Kalnik, Papuk i Psunj (npr. VRBANAC, 1996; MALVIĆ, 2003). Slijed sedimenata započinje brečokonglomeratima, konglomeratima, pješčenjacima, siltovima, te se nastavlja međusobnom izmjenom pješčenjaka i lapora.

Mehanizmi kojima je taložen siliciklastični materijal u tadašnjem priobalju i plitkom moru bile su aluvijalne lepezne delte (TIŠLJAR 1993; MALVIĆ, 1998, 2006), a izvor materijala lokalni. To podrazumijeva da je većina klastita u delte dospjela trošenjem okolnih izdanaka paleozojskih i mezozojskih stijena. Drugi obilan izvor karbonatnih klastita bili su koralinacejski i briozojksi grebeni koji su nastajali u plitkim marinskim sredinama. Kraj badena obilježava taloženje kalcitnih lapora i glinovitih vapnenaca.

Sredina postaje mirnija, čemu je glavni razlog slabljenje transtenzijskih pokreta.

Upravo u takvim mirnim uvjetima oplicavanja započinje razdoblje sarmata (13,0-11,5 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998), čiji je početak zapravo vrlo teško odijeliti od vršnog dijela badenskih naslaga. Talože se glinoviti lapori i pješčenjaci (VRBANAC, 1996; RÖGL, 1996, 1998).

Donji panon (11,5-9,3 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998) (tablica 1) obilježava djelomično zapunjavanje bočatih plićaka u jednim, te subsidencijsku ravnotežu s donosom klastita u drugim prostorima (npr. RÖGL & STEININGER, 1984; VRBANAC, 1996; RÖGL, 1996, 1998). Naslage pripadaju formaciji Prkos (ŠIMON, 1980; slika 2), a predstavljene su ritmičnim izmjenama glinovitog vapnenca, siltnog lapora, lapora i pješčenjaka. Na rubovima depresija postojale su manje delte (npr. NOVAK ZELENICA et al., 2013).



Slika 2. Formacije u Savskoj depresiji (prilagođeno iz SAFTIĆ et al., 2003; *početak ekstenzije prema ČORIĆ et al., 2009; megaciklusi prema VELIĆ et al., 2002)

Figure 2. Formations in the Sava Depression (adapted from SAFTIĆ et al., 2003; *extension beginning after ČORIĆ et al., 2009; megacycles after VELIĆ et al., 2002)

Slijede naslage gornjega panona (9,3-7,1 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998) (tablica 1) koje litostratigrafski odgovaraju formaciji Ivanić Grad (slika 2) (ŠIMON, 1980). Unutar formacije Ivanić Grad izdvojena su dva litostratigrafska člana. To su pješčenjaci Okoli i pješčenjaci Iva sa značajnim količinama ugljikovodika u Savskoj depresiji, a detaljno ih veu istražio PLETIKAPIĆ (1965), prikazujući vezu ležišnih stijena formacije Ivanić Grad u naftnim i plinskim poljima Kloštar, Ivanić, Žutica i Okoli. Također, je naznačio ulogu Moslavačke gore kao lokalnog izvora detritusa za gornjopanonska ležišta. Smatra da je Moslavačka

gore u vrijeme kasnoga panona bila otok, ali da nikako nije mogla biti i glavni izvor materijala. Na temelju količine istaloženog detritusa navodi kako bi s Moslavačke gore trebala biti erodirana prizma visine oko 1200 m. Takvu visinu i tako brzu eroziju teško je pretpostaviti na otoku, gdje su se mogli razviti samo kratki tokovi površinskih voda. Ipak, autor ne isključuje vrlo mali mogući utjecaj Moslavačke gore kao lokalnog izvora detritusa, budući da je kopneno područje bilo oko 200 m visoko. Također je u svojoj disertaciji, na temelju paleogeografske rekonstrukcije dao približne konture otoka, koji je u to vrijeme postojao na području

Moslavačkog masiva, te pojas laguna i močvarišta kojima je otok bio odvojen od žala u bočatom okolišu nekadašnjeg jezera. Taj rad, s neizravnim dokazivanjem mogućih manjih delti i aluvijalnih lepezi koje su se razvijale na rubu Moslavačke gore prema Savskoj depresiji, nastavljen je i objavljen u NOVAK ZELENIKA et al. (2013).

Litološki su gornjopanonski sedimenti predstavljeni laporima, siltovima i pješčenjacima. Sedimentacija u vrijeme mlađega panona označava početak znatne promjene taložnog okoliša, kada počinje dominirati mehanizam turbiditnih struja. Taloženje se odvijalo cikličkim turbiditnim tokovima u bočatim do (kasnije) slatkovodnim sredinama (npr. RÖGL & STEININGER, 1984; VRBANAC, 1996; RÖGL, 1996, 1998). Pješčenjaci koji čine gornjopanonska ležišta su najčešće sitnozrnati, sa šupljikavošću od 10 do 33%, a vrijednosti se regionalno smanjuju od sjeverozapada prema jugoistoku depresije. Morfologija pješčenih tijela prati smjer taložnih struja (SAFTIĆ et al., 2003) s općim pružanjem sjever-sjeverozapad/jug-jugoistok. Glavni izvor sedimenata bio je u Istočnim Alpama, od kuda je višestrukim turbiditnim strujama, uz regionalne tektonske rampe, prenošen do mjesta taloženja (npr. ŠIMON, 1980; MALVIĆ, 2012).

Sedimenti donjeg pontaa (7,1-6,3 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998) (**tablica 1**) litostratigrafski odgovaraju formaciji Kloštar Ivanić (ŠIMON, 1980) (**slika 2**). Predstavljani su izmjenom pješčenjaka i lapora. Pješčenjaci su taloženi djelovanjem turbiditnih tokova u najdubljim dijelovima taložnog prostora, a izvor sedimenata također su bile Alpe. U mirnim razdobljima, kada turbiditne struje nisu bile aktivne jer nije bilo gravitacijske nestabilnosti i dovoljne količine akumuliranog materijala, taložili su se lapori, kao sedimenti karakteristični za mirne uvjete dubljovodnih okoliša. Donjopontske naslage vrlo je detaljno obradio SAFTIĆ (1998) povezujući litostratigrafske članove naslaga turbiditnog podrijetla, u zapadnom dijelu Savske depresije u genetske stratigrafske jedinice. Ova vrsta jedinica omogućila je najdetaljniju korelaciju, jer one na temelju fizičkih svojstava probušenih stijena objedinjuju istovremene taložne okoliše.

U gornjem pontu (6,3-5,6 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998) (**tablica 1**) polako dolazi do promjene taložnih mehanizama koji ponovno postaju lokalni (delte), te do zapunjavanja taložnog prostora. Naslage gornjega pontaa litostratigrafski pripadaju formaciji Široko polje (ŠIMON, 1980) (**slika 2**) i predstavljene su glinovitim laporima, laporovitim glinama i glinama te pojavama lignita, karakterističnim za slatkovodni jezerski okoliš (npr. RÖGL & STEININGER, 1984; VRBANAC, 1996; RÖGL, 1996, 1998).

U vrijeme pliocena i donjega pleistocena (5,6-0,8 mil. god.; HAQ & EYSINGA, 1998) (**tablica 1**) sedimentacija se nastavila u plćim ostatcima

Panonskog jezera, zapunjavajući ga laporovitim glinama, laporima te rjeđe pjeskovitim laporima, a tek lokalno u deltama i pijescima, dok dominantno kopneni okoliši prevladavaju od srednjega pleistocena do danas (holocen). Najmlađe naslage su nekonsolidirani sedimenti poput prapora i gline, a slijed završava uglavnom šljunkom i pijeskom te humusom. Ove naslage pripadaju formaciji Lonja (ŠIMON, 1980) (**slika 2**). Nešto kasnije talože se i krupnozrnati klastiti (šljunak, pijesak) te glina uz pojavu lignita. U kvartaru dolazi do klimatskih promjena i konačne inverzije struktura, koje su danas antiklinale, te taloženja sedimenata karakterističnih za periode glacijala i interglacijala, a o njihovim taložnim okolišima može se više naći u radovima, npr. VELIĆ & SAFTIĆ (1991), VELIĆ & DURN (1993), BAČANI et al. (1999), CVETKOVIĆ (2013).

3. Osnovno o sekvencijskim indikatorskim simulacijama

Sekvencijske indikatorske simulacije (SIS) su metoda unutar skupine stohastičkih simulacija kao alata za procjenu geoloških varijabli. Kao ulazne podatke za izradbu variograma i kartiranje koriste prvo izvorne vrijednosti, njihovu razdiobu i granične vrijednosti za podjelu u razrede, ali samo kartiranje se odvija na temelju indikatorskih varijabli, kao rezultata indikatorske transformacije, koja je nelinearna metoda primijenjena na linearne jednadžbe kriginga. Sekvencijske indikatorske simulacije, dakle, uvjetne su simulacije i procjena se radi samo na smjestaštima na kojima nije bilo mjerenja (MALVIĆ, 2008; JUANG et al., 2004).

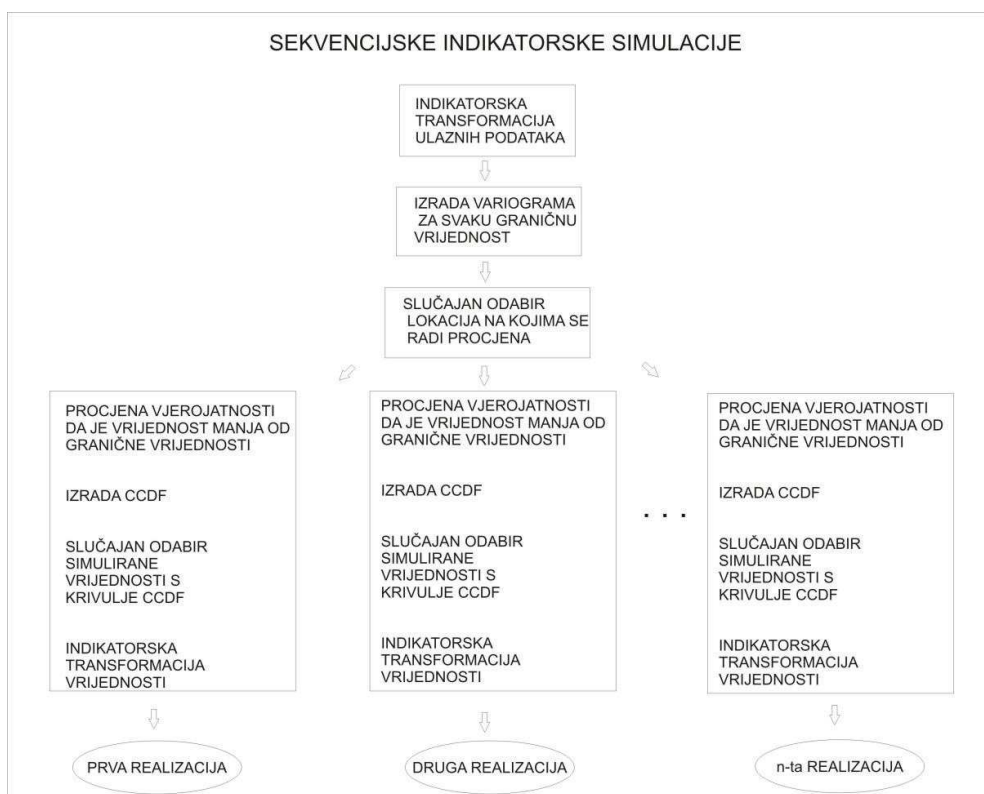
Sama procedura sekvencijskih indikatorskih simulacija (**slika 3**) odvija se na način da je najprije potrebno: (1) odrediti granične vrijednosti te napraviti indikatorsku transformaciju ulaznih podataka, zatim (2) odrediti variogram za svaku graničnu vrijednost, (3) slučajnim redoslijedom odrediti lokacije na kojima će se raditi procjena, a pri tome svaka lokacija na kojoj se simulira vrijednost može biti određena samo jednom. Nadalje:

(a) Za slučajno odabranu lokaciju koristi se indikatorski variogram, a procjenjuje se vjerojatnost da je vrijednost na tom mjestu manja od granične vrijednosti;

(b) Radi se CCDF (engl. *Conditional Cumulative Distribution Function*, hrv. Uvjetna kumulativna funkcija razdiobe) za odabrani broj graničnih vrijednosti;

(c) Slučajno se odabire simulirana vrijednost s krivulje CCDF za lokaciju u kojoj se procjenjuje vrijednost;

(d) Dodaje se indikatorski kod, odnosno radi se indikatorska transformacija, kako bi se modelirala CCDF iduće lokacije.



Slika 3. Dijagram toka obradbe podataka metodom sekvencijskih indikatorskih simulacija (prilagođeno prema NOVAK ZELENICA, 2012)

Figure 3. Flow chart of data processing in the sequential Gaussian simulations (adapted after NOVAK ZELENICA, 2012)

Koraci (a) do (d) se ponavljaju i tako procjenjuju vrijednosti na svim lokacijama gdje nije bilo mjerenja, čime je dobivena prva realizacija (JUANG et al., 2004). Ostale se realizacije također dobivaju na isti način.

Metodom sekvencijskih indikatorskih simulacija, algoritmima programa *Wingslib*, mogu se načiniti i indikatorske karte koje prikazuju vjerojatnosti u odnosu na vrijednost veću od odabrane granične vrijednosti. Mogu se vrlo lako usporediti s kartama vjerojatnosti dobivenim metodom indikatorskog kriginga. Za sekvencijske indikatorske simulacije nije nužna normalna razdioba ulaznih podataka. One podrazumijevaju, poput svih indikatorskih metoda, samo stacionarnost trećega reda, što znači da je variogram jedino reprezentativno statističko obilježje podataka. Budući da koriste indikatorsku transformaciju, izvorni podatci skup su samo dviju kategoričkih vrijednosti (0 i 1). Variogrami za svaku graničnu vrijednost moraju biti standardizirani jer je izvorni skup podataka isti, što znači da je, bez obzira

na graničnu vrijednost, ulazna varijanca uvijek ista, iako su se razlike izlaznog skupa dogodile zbog indikatorske transformacije. Jedan od rezultata sekvencijskih indikatorskih simulacija su realizacije koje prikazuju vrijednosti kartirane varijable, ali glavni izlaz su karte vjerojatnosti za određenu graničnu vrijednost.

4. Ulazni skup podataka

Ulazni skup podataka (varijabla šupljikavosti) prikazan je u **tablici 2**. Šupljikavost predstavlja srednju vrijednost dobivenu iz karotažnih mjerenja. Budući da je riječ o starijim bušotinama, za izračun šupljikavosti koristila se jedina dostupna krivulja krivulja spontanog potencijala (SP). Gdje je bilo moguće taj podatak se korelirao s podatkom iz jezgre. Debljina predstavlja ukupnu debljinu ležišta uključujući sve litofacijese od krovine do podine. Radilo se o okomitim bušotinama.

Tablica 2. Ulazni skup podataka za kartiranje sekvencijskim indikatorskim simulacijama**Table 2.** Input dataset for mapping using sequential indicator simulations

<i>Bušotina</i>	<i>Šupljikavost, %</i>	<i>Debljina, m</i>	<i>Bušotina</i>	<i>Šupljikavost, %</i>	<i>Debljina, m</i>
Klo-1	19,9	13,0	Klo-35	13,8	3,0
Klo-12	19,5	12,0	Klo-43	5,5	4,5
Klo-16	19,6	12,0	Klo-48	19,7	13,5
Klo-20	21,1	13,0	Klo-57	18,2	25,0
Klo-22	23,3	11,5	Klo-58	21,8	6,0
Klo-23	20,5	12,0	Klo-59	18,1	9,0
Klo-24	20,1	11,0	Klo-71	18,5	10,0
Klo-26	21,2	9,5	Klo-72	19,6	11,0
Klo-27	17,9	20,0	Klo-95	22,0	8,0
Klo-28	19,2	17,0	Klo-104	18,4	6,0

5. Kartiranje litofacijesa donjopontskog ležišta sekvencijskim indikatorskim simulacijama

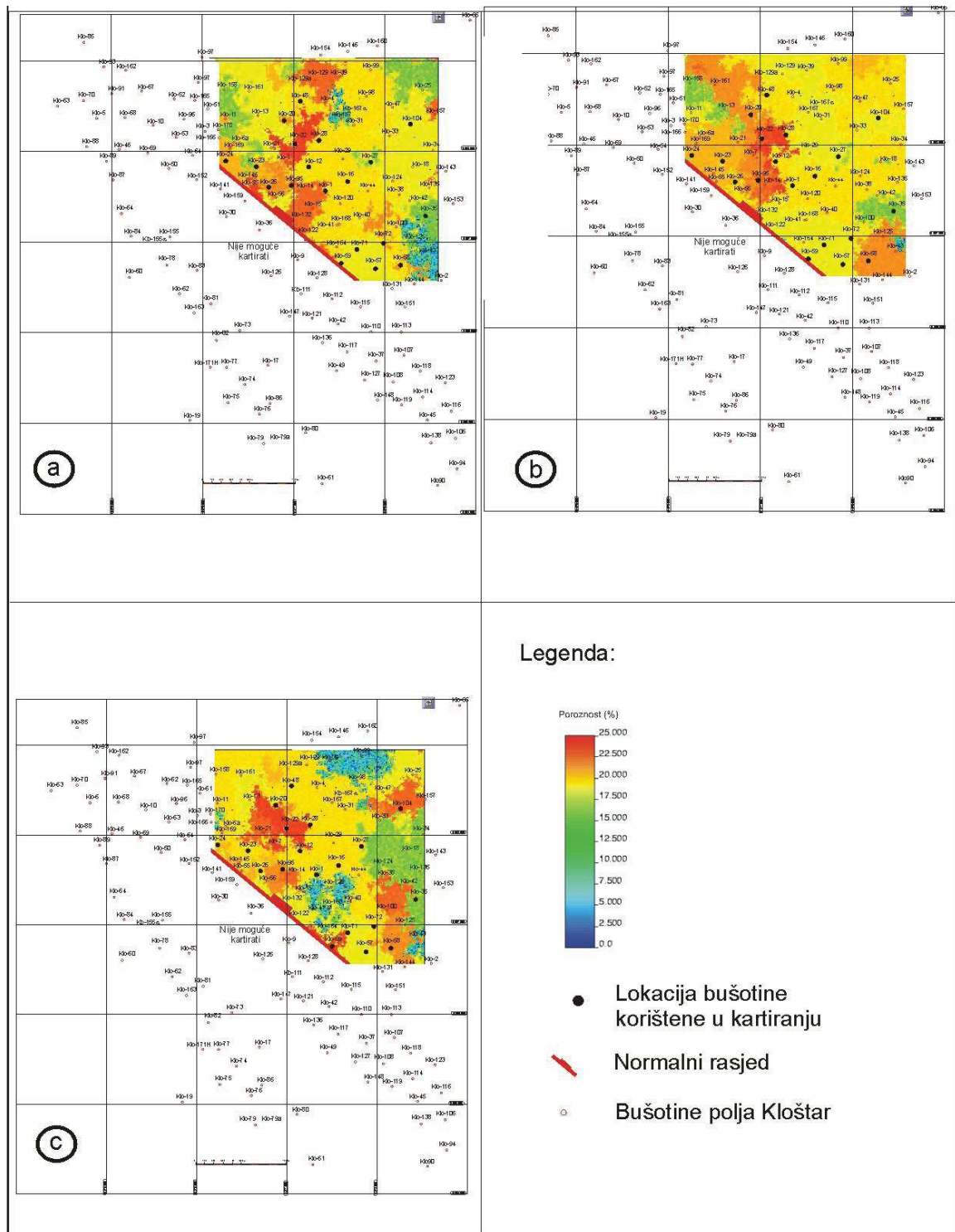
Kartiranje sekvencijskim indikatorskim simulacijama napravljeno je tako da dobivene karte prikazuju vjerojatnost da je kartirana varijabla veća od određene granične vrijednosti. Analizirane su varijable šupljikavosti i debljine donjopontskog ležišta, koje su odabrane kao varijable koje posredno o crtavaju i litofacijes tih pješčenjačkih slojeva. Napravljeno je stotinu realizacija, a prikazane su prva, pedeseta i stota s vrijednostima varijabli i vjerojatnostima za odabranu graničnu vrijednost.

5.1. Kartiranje izravnih vrijednosti

Prva, pedeseta i stota realizacija varijable šupljikavosti donjopontskog ležišta, kartirana sekvencijskim indikatorskim simulacijama, prikazana je **slikom 4 a-c**. Na prvoj realizaciji (**slika 4 a**) najveće vrijednosti šupljikavosti su u središnjem dijelu ležišta, što se zapaža i na ostalim realizacijama (**slika 4 b i c**). Najniža vrijednost od oko 5% prikazana je na stotoj realizaciji (**slika 4 c**) u sjevernom i središnjem

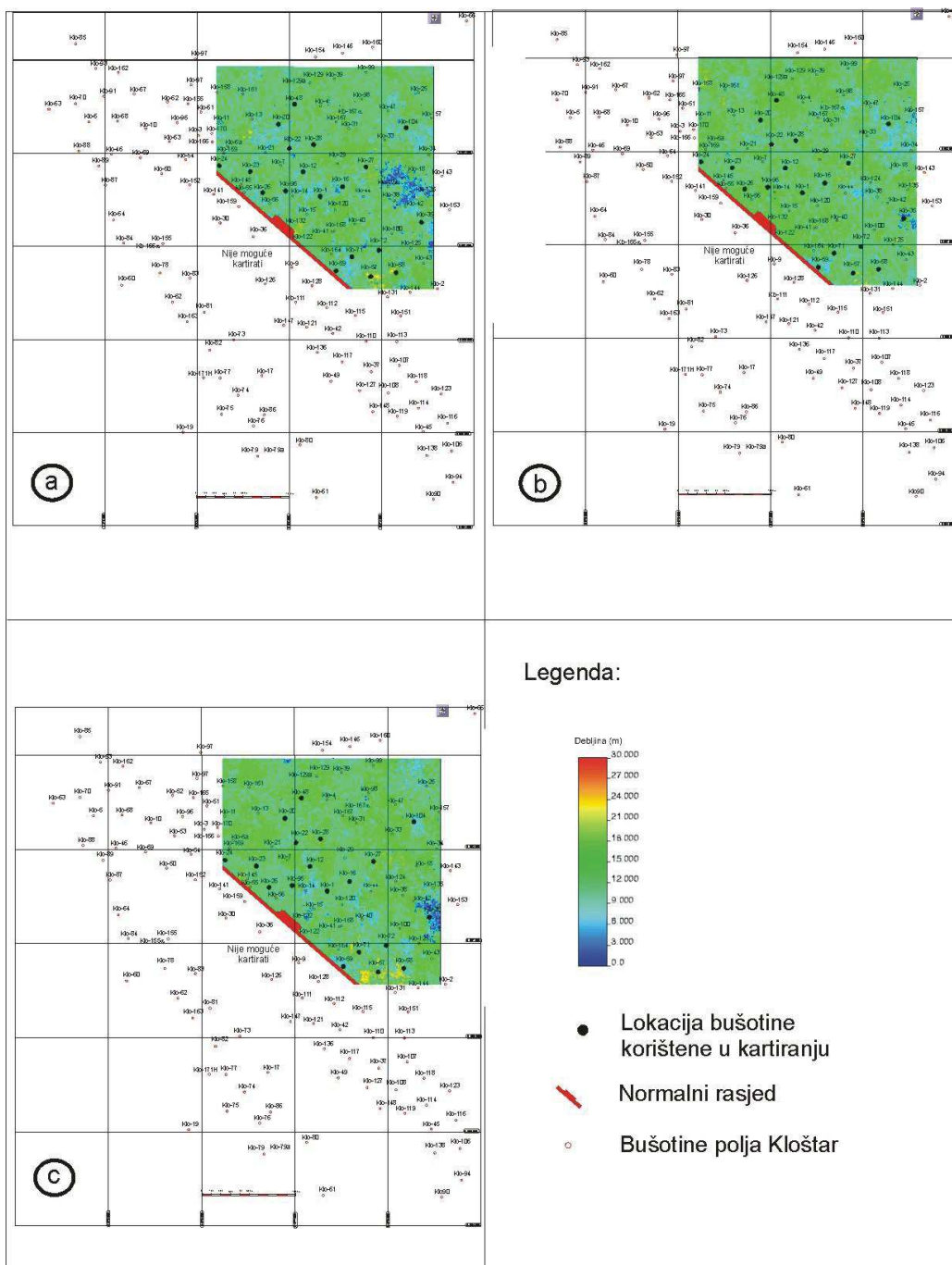
dijelu ležišta. U istom području, na ostalim realizacijama, vrijednost je procijenjena između 18 i 19%, što ukazuje na veliku varijabilnost. To se opaža i u istočnom dijelu ležišta (**slika 4 a-c**). Takve razlike, tj. značajne nesigurnosti procjene vjerojatno su uvjetovane bočnom promjenom litofacijesa u smjeru istoka.

Nadalje, na **slici 5 a-c** prikazana je prva, pedeseta i stota realizacija distribucije debljine donjopontskog ležišta kartirana također sekvencijskim indikatorskim simulacijama. Debljine (**slika 5 a-c**) na cijelom kartiranom području su dosta jednolične, bliske srednjim vrijednostima. U prvoj su realizaciji (**slika 5 a**) debljine su procijenjene na oko 3 m, a u pedesetoj i stotoj (**slika 5 b i c**) na oko 15 m. Niti na kartama šupljikavosti (**slika 4 a-c**), niti debljine (**slika 5 a-c**) se ne mogu jednoobrazno izdvojiti taložni kanali, no njihovom zajedničkom interpretacijom mogu se naznačiti njihovi najaktivniji dijelovi, tj. dijelovi koji su kroz najduža razdoblja aktivnosti primili najveće količine materijala. To su dijelovi s velikim debljinama taložina (no ne nužno i najvećim) te prosječno s najvećim šupljikavostima.



Slika 4. Distribucija šupljikavosti donjopontskog ležišta kartirana sekvencijskim indikatorskim simulacijama: a-prva realizacija, b-pedeseta realizacija i c-stota realizacija (NOVAK ZELENIKA et al., 2013)

Figure 4. Distribution of porosity in Lower Pontian reservoir mapped by sequential indicator simulations: a-1st realisation, b-50th realisation and c-100th realisation (NOVAK ZELENIKA et al., 2013)



Slika 5. Distribucija debljine donjopontskog ležišta kartirana sekvencijskim indikatorskim simulacijama: a-prva realizacija, b-pedeseta realizacija i c-stota realizacija (NOVAK ZELENIKA et al., 2013)

Figure 5. Distribution of thickness in Lower Pontian reservoir mapped by sequential indicator simulations: a-1st realisation, b-50th realisation and c-100th realisation (NOVAK ZELENIKA et al., 2013)

5.2. Kartiranje vjerojatnosti da su vrijednosti veće od graničnih

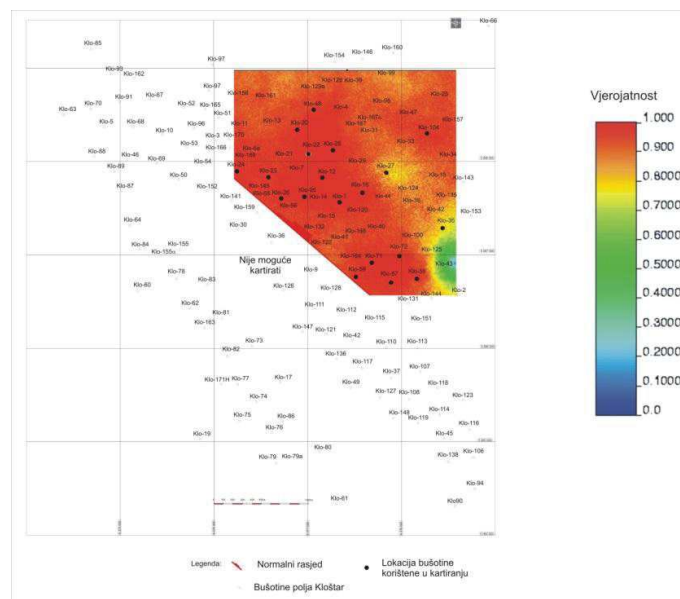
Zatim su indikatorske simulacije uporabljene za prikazivanje vjerojatnosti da su vrijednosti u nekom području veće od odabrane granične vrijednosti.

Takve karte prikazane su slikama 6, 7, 8, 9 i 10 za šupljikavost i slikama 11, 12, 13 i 14 za debljinu ležišta.

Najmanja vjerojatnost da je šupljikavost veća od 14% (slika 6) iskazana je u jugoistočnom dijelu karte. Povećavajući graničnu vrijednost na 18%

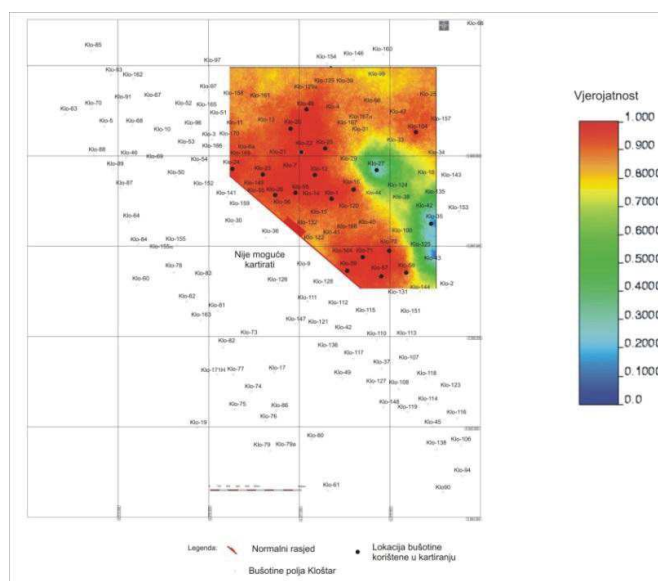
(slika 7) područje najnižih vjerojatnosti i dalje ostaje na jugoistoku, no proširuje se u smjeru sjeveroistoka, paralelno s Kloštarskim rasjedom, koji je na kartama (slike 4 do 15) prikazan kao jugozapadni rubni normalni rasjed. Na kartama šupljikavosti veće od 19% (slika 8) može se uočiti područje najvećih šupljikavosti na zapadnom dijelu ležišta i glavni kanal pružanja sjeverozapad-jugoistok. Poveća li se

granična vrijednost na 20% (slika 9) ostaju vidljivi samo najpropusniji dijelovi glavnoga kanala, dok na kartama od 22 % (slika 10) preostaju vidljivi samo dva najdublja dijela taložnoga prostora analiziranog dijela donjega pontaa, u kojem su preostali najpropusniji klastiti.



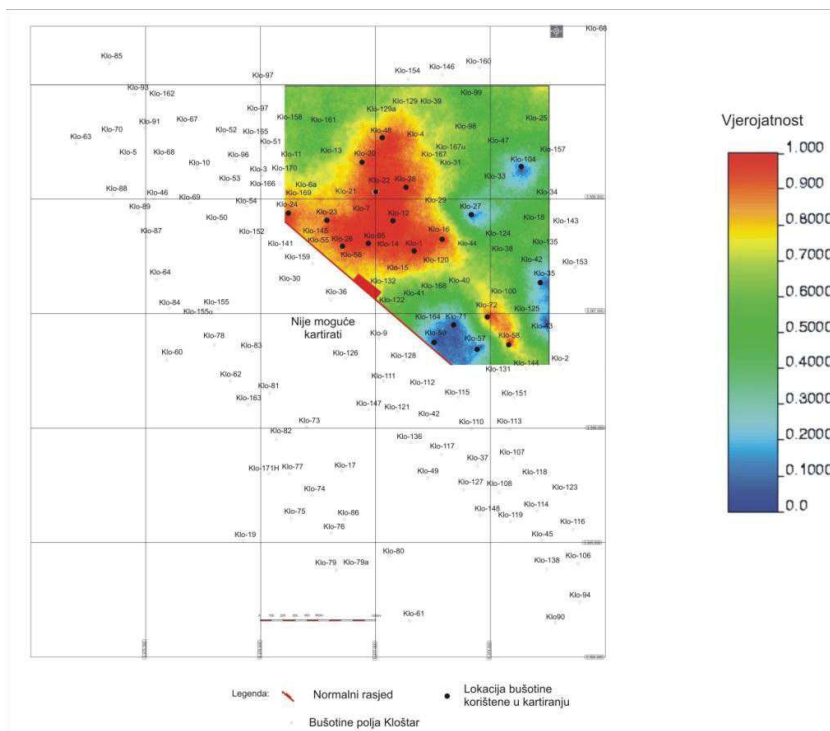
Slika 6. Karta vjerojatnosti varijable šupljikavosti donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 14% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 6. Probability map of porosity variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 14% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



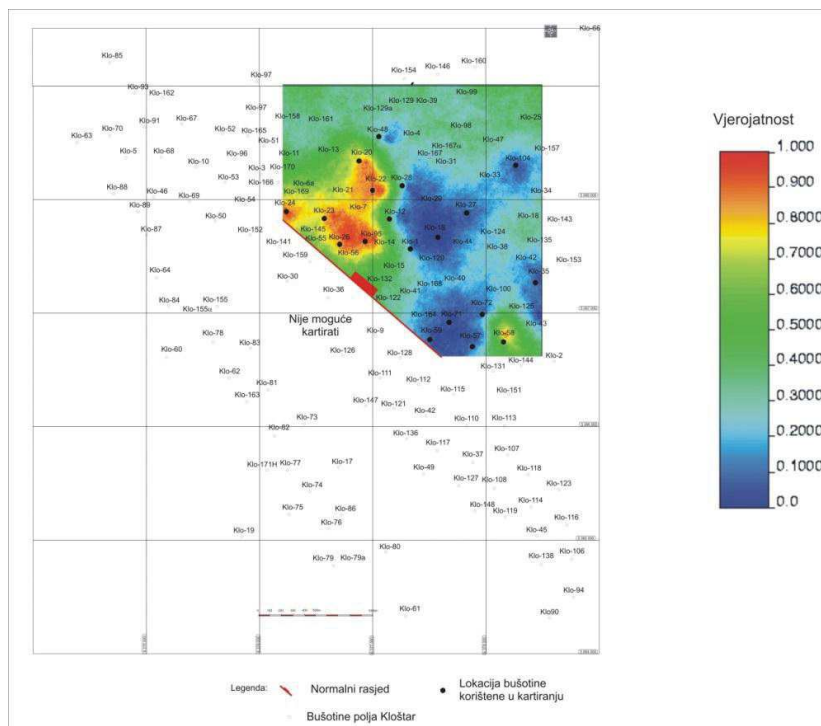
Slika 7. Karta vjerojatnosti varijable šupljikavosti donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 18% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 7. Probability map of porosity variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 18% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



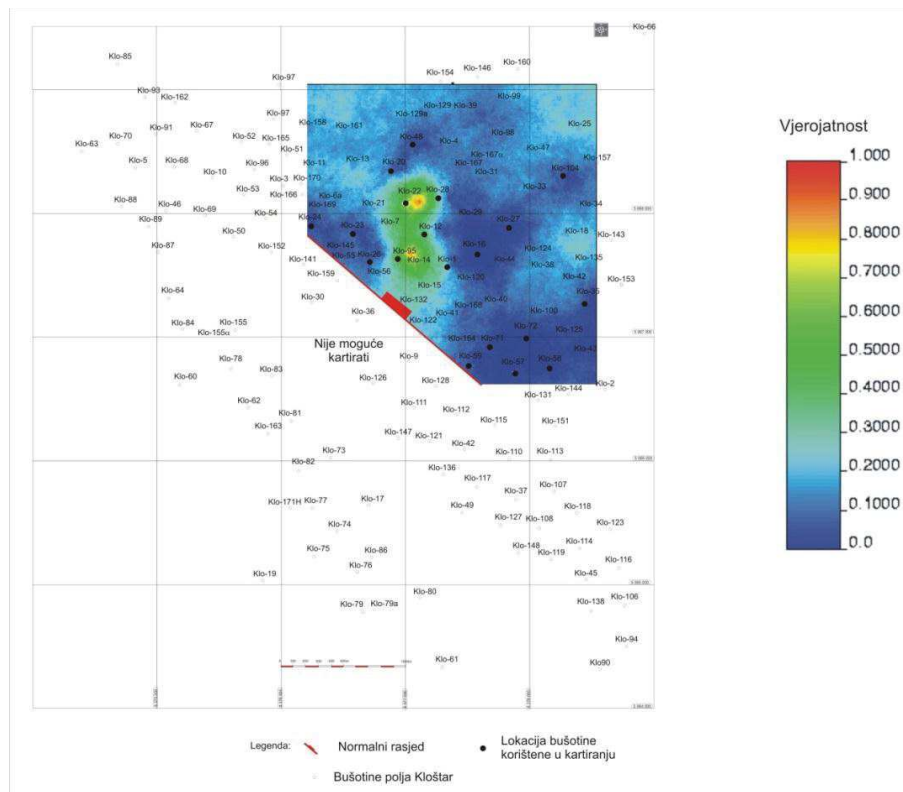
Slika 8. Karta vjerojatnosti varijable šupljikavosti donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 19% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 8. Probability map of porosity variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 19% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



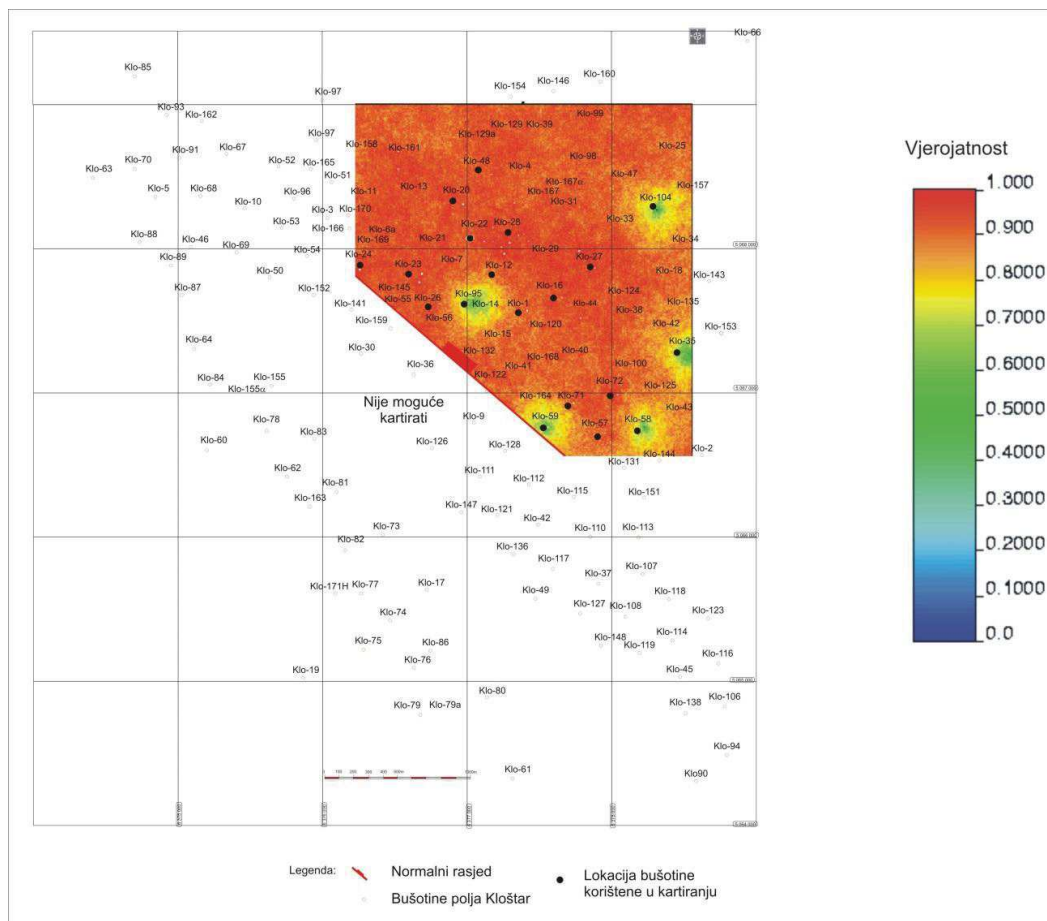
Slika 9. Karta vjerojatnosti varijable šupljikavosti donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 20% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 9. Probability map of porosity variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 20% (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



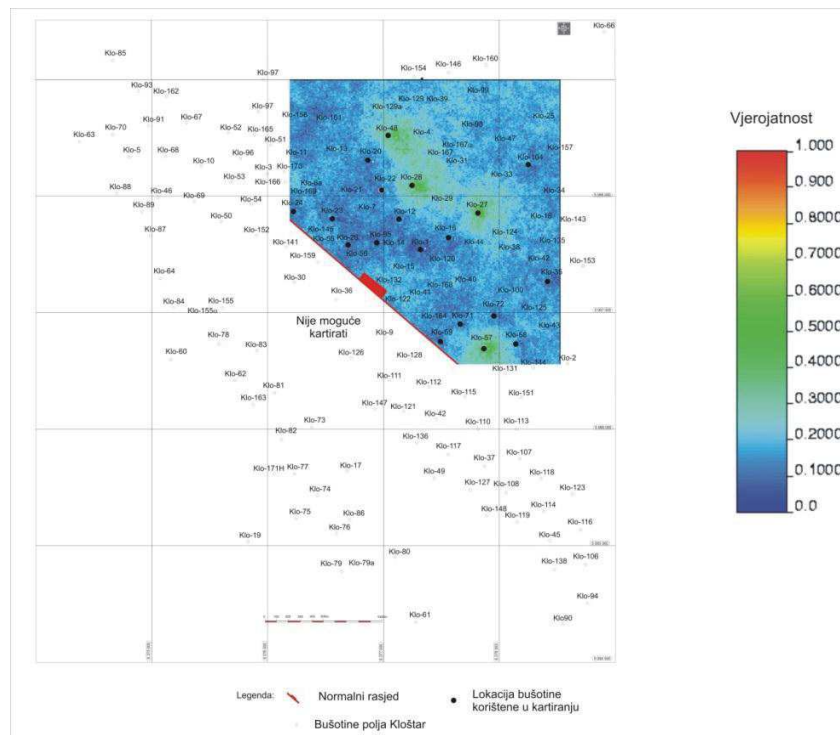
Glede kartiranja vjerojatnosti debljine, vrlo je lako uočiti da one u najvećem dijelu ležišta prelaze 5 m (slika 11), s izuzetkom minimuma na istoku strukture. Povećavajući graničnu vrijednost na 9 m, broj takvih minimuma se povećava na 5 (slika 12). Na karti vjerojatnosti za graničnu vrijednost 13 m (slika 13) mogu se pratiti povećane debljine u pravcu sjeverozapad-jugoistok, što odgovara pružanju konturna glavnog taložnoga kanala prepoznatog i na

kartama šupljikavosti. Međutim smjestišta najvećih debljina, većih od 17 m (slika 14), vrlo malo utječu na vrijednosti oko njih, a zanimljivo je kako se ne podudaraju sa smjestištima najvećih šupljikavosti. Objašnjenja može biti nekoliko, no najvjerojatnije je kako je kompakcija te subsidencija uzrokovala upravo u tim dijelovima nakupljanje većih količina pelita unutar ležišta, a konačno i najveće ukupne debljine ležišne sekvencije.



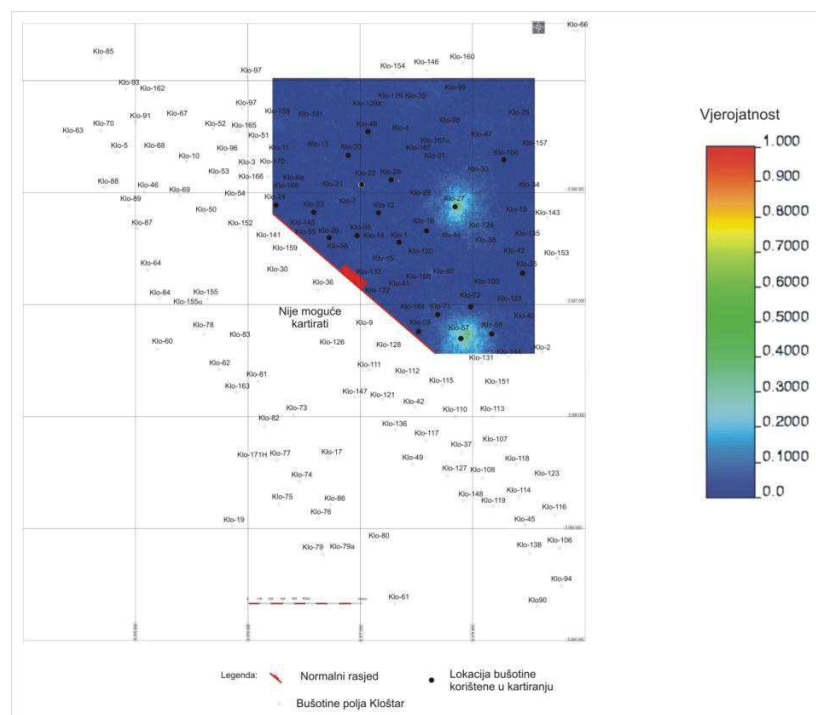
Slika 12. Karta vjerojatnosti varijable debljine donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 9 m (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 12. Probability map of thickness variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 9 m (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



Slika 13. Karta vjerojatnosti varijable debljine donjopontskog ležišta veće od granične vrijednosti 13 m (NOVAK ZELENICA et al., 2013)

Figure 13. Probability map of thickness variable in Lower Pontian reservoir higher than cut-off 13 m (NOVAK ZELENICA et al., 2013)



6. Pregled najvažnijih rezultat i diskusija

Na početku diskusije treba napomenuti kako je svaki geološki model, zbog ograničenja koje točkasto uzorkovanje ima, uvijek u konačnici stohastički model i sadrži nesigurnosti. Naravno, unutar njega moguće je napraviti dodatne analize, prvenstveno povećanjem broja ulaznih podataka pa i broja ležišnih varijabli koje se kartiraju (propusnost, mineralni sastav, zasićenje ili udio nepropusnih naslaga).

Pješčenjačka tijela treba analizirati kao taložne objekte s prijelaznim litofacijesima, budući da su do sada ležišta promatrana uglavnom kroz odnos litofacijesa pješčenjaka i lapora, te ograničena linijom bočne promjene facijesa. Razlike u litofacijesima posljedica su taloženja različitih turbiditnih sekvencija i njihovih debljina te njihova prostornog rasporeda uvjetovanog paleobatimetrijskim odnosima.

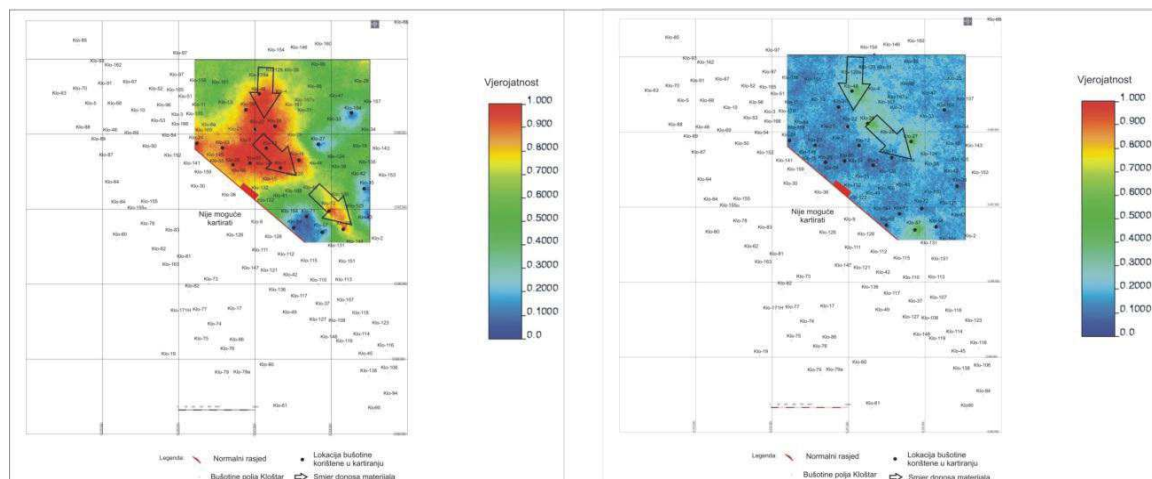
Rješenje toga problema prikazano je na primjeru kartiranja šupljikavosti i debljina indikatorskim metodama na podacima donjopontskog ležišta polja Kloštar u Savskoj depresiji. Pri tomu je korištena pretpostavka kako veća šupljikavost označava neki od dominantno pješčenjačkih litofacijesa, a smanjena šupljikavost neki od laporovitih litofacijesa. Takvim kriterijem bilo je moguće razlikovati litofacijese čistih pješčenjaka, laporovitih pješčenjaka, pjeskovitih lapora i čistih bazenskih lapora. Zbog razvedenog reljefa dna taložnog bazena, u najdubljim dijelovima

kanala taložili su se pješčenjaci, dok se prema rubovima kanala očekivalo sve više laporovite komponente. Interpretacija prostornog rasporeda šupljikavosti na kartama vjerojatnosti u ležištima donjopontske starosti ukazala je da je krupniji materijal u ovome dijelu Savske depresije uglavnom dolazio sa sjevera (tako su interpretirali i VRBANAC et al., 2010).

Također je pretpostavljeno kako bi povećane debljine trebale ukazati na središnji dio taložnog kanala u kojem se taložio krupnozrnati materijal. Prilikom kartiranja donjopontskog ležišta povećane šupljikavosti samo su se djelomice poklapale s najvećim debljinama.

Zanimljiva je i uloga glavnoga tektonskog elementa strukture Kloštar. Tijekom mlađega ponta nastaje glavni Kloštarski rasjed. Za posljedicu, preostali dio suspendiranog materijala turbidita koji se nije istaložio unutar strukture već je dosegao taj rasjed (**slika 15**), bio je dodatno usporen. Padom energije struje dolazi ponovno do nagloga taloženja dijela srednjozrnatoga pijeska, a ostatak se nastavlja prenositi uporedno s rasjedom prema jugoistoku. Tako su interpretirane karte vjerojatnosti šupljikavosti veće od 19% i debljine veće od 13 m (**slika 15**).

Međutim, zbog razlike položaja vjerojatnosti najvećih debljina i najvećih šupljikavosti (**slika 15**), očito je kako su turbiditne struje najkrupniji materijal taložile uz rasjed, dok su najveće debljine u područjima na kojima su se zajednički taložili pijesci, siltovi, ali i bazenski peliti (**slika 14**).



Slika 15. Smjer donosa materijala u donjem pontu interpretiran na karti vjerojatnosti šupljikavosti veće od 19% (lijevo) i debljine veće od 13 m (desno)

Figure 15. Direction of material transport during Lower Pontian shown on probability map for porosity higher than 19 % (left) and thickness higher than 13 m (right)

Postojao je još jedan značajan mehanizam oblikovanja i posebice utjecaja na debljine ležišta. Turbiditne su struje erodirale svoju podinu (odnosno bazenske lapore koji su se taložili u mirnom razdoblju između dva turbiditna događaja). Zbog takvog mehanizma u samome središtu kanala nalaze se ponekad amalgirani srednjo i sitnozrnati pješčenjaci, a ne izmjena pješčenjaka i lapora, posebice ako se rubovi kanala nisu značajnije pomicali tijekom vremena između dva taložna događaja.

7. Zaključak

Indikatorskim metodama, odnosno odabranim graničnim vrijednostima, dobiveno je vrlo točno ocrtavanje prostornoga rasporeda četiri litofacijesa, interpretiran smjer donosa materijala, te pružanje glavnoga taložnog kanala prema rubu strukture Kloštar te se litološki mijenjaju od pješčenjaka, preko laporovitih pješčenjaka, pjeskovitih lapora do lapora. Sve kartirane značajke, poput glavnih taložnih središta, položaja rasjeda te općega pružanja strukture, lako se prepoznaju na kartama šupljikavosti. Nadalje, karte debljina mogu poslužiti kao vrlo koristan "sekundarni" izvor podataka i olakšati interpretaciju taložnih uvjeta preko karata šupljikavosti. Sekvencijske indikatorske simulacije su se iskazale kao vrlo dobar i precizan alat za kartiranje izravnim mjerjenih podataka (a ne samo kategoričkih) te dobivanje niza realizacija iz kojih se odabiru one koje su reprezentativne.

8. Literatura

- Bačani, A., Šparica, M. & Velić, J. (1999): Quarternary Deposits as the Hydrogeological System of Eastern Slavonia. *Geol. Croatica*, 52, 2, 141-152, Zagreb.
- Čorić, S., Pavelić, D., Rögl, F., Mandić, O., Vrabac, S., Avanić, R., Jerković, I. & Vranjković, A. (2009): Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys). *Geol. Croatica*, 62, 1, 31-43, Zagreb.
- Cvetković, M. (2013): Naftnogeološki potencijal i litostratigrafska razradba trećega neogensko-kvartarnog megaciklusa u Savskoj depresiji (sa proširenim engleskim sažetkom). Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 175 pp., Zagreb.
- Haq, B.U. & Eysinga, F.W.B. (ured.) (1998): Geological Time Table, Fifth Edition (Wall Chart). Elsevier Science, Amsterdam.
- Juang, K. W., Chen, Y.S. & Lee, D. Y. (2004): Using sequential indicator simulation to asset the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental*

Pollution 127, 229-238, Cambridge.

- Malvić, T. (1998): Strukturni i tektonski odnosi te značajke ugljikovodika širega područja naftnoga polja Galovac-Pavljani (sa proširenim engleskim sažetkom). Magistrski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 112 pp., Zagreb.
- Malvić, T. (2003): Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini (Oil-geological relations and probability of discovering new hydrocarbon reserves in the Bjelovar Sag (na hrvatskom i engleskom). Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 123 pp., Zagreb.
- Malvić, T. (2006): Middle Miocene depositional model in the Drava Depression described by geostatistical porosity and thickness maps (case study: Stari Gradac-Barcs Nyugat Field). *Rud.-geol.-naft. zbornik*, 18, 63-70, Zagreb.
- Malvić, T. (2008): Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka. Sveučilišni priručnik, INA-Industrija nafte d.d., 103 pp., Zagreb.
- Malvić, T. (2012): Review of Miocene shallow marine and lacustrine depositional environments in Northern Croatia. *Geological Quarterly*, 56, 3, 493-504, Varšava.
- Novak Zelenika, K. (2012): Deterministički i stohastički geološki modeli gornjomiocenskih pješčenjačkih ležišta u naftno-plinskom polju Kloštar (s engleskim sažetkom). Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 190 pp., Zagreb.
- Novak Zelenika, K., Velić, J. & Malvić, T. (2013): Local sediment sources and palaeoflow directions in Upper Miocene turbidites of the Pannonian Basin System (Croatian part), based on mapping of reservoir properties. *Geological Quarterly*, 57, 1, 17-30, Varšava.
- Malvić, T. & Velić, J. (2011): Neogene tectonics in Croatian part of the Pannonian Basin and reflectance in hydrocarbon accumulations. U: *New Frontiers in Tectonic Research: at the Midst of Plate Convergence* (ur. U. Schattner), 215-238. InTech., Rijeka.
- Pletikapić, Ž. (1965): Stratigrafija, paleogeografija i ugljikovodični potencijal Ivanić Grad formacije na rubu Moslavačke gore. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 71 pp., Zagreb.
- Rögl, F. and Steininger, F. (1984): Neogene Paratethys, Mediterranean and Indo-Pacific seaways. *Geol. J. Spec. Issue*, 11, 171-200, New York.
- Rögl, F. (1996): Stratigraphic correlation of the Paratethys Oligocene and Miocene. *Mitt. Ges. Geol. Bergbaust Wien*, 41, 65-73, Wien.
- Rögl, F. (1998): Palaeographic consideration for Mediterranean and Paratethys Sea ways (Oligocene to Miocene). *Ann. Naturhist. Mus. Wien (Serie A)*, 99, 279-310, Wien.

- Saftić, B. (1998): Genetska stratigrafska sekvencijska analiza u pontskim naslagama zapadnoga dijela Savske depresije [s proširenim sažetkom]. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 136 pp., Zagreb.
- Saftić B., Velić J., Sztanő O., Juhász G. & Ivković Ž. (2003): Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW Part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). *Geol. Croatica* 56, 1, 101—122. Zagreb.
- Šimon, J. (1980): Prilog stratigrafiji i taložnom sustavu pješčanih rezervoara Sava-grupe mlađeg tercijara u Panonskom bazenu Sjeverne Hrvatske. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 56+82 pp., Zagreb.
- Tišljar, J. (1993): Sedimentary bodies and depositional models for the Miocene oil-producing areas of Ladislavci, Beničanci and Obod. *Nafta*, 44, 10, 531—542, Zagreb.
- Velić, J. & Saftić, B. (1991): Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešić and Samobor. *Geol. vjesnik*, 44, 69-82, Zagreb.
- Velić, J. & Durn, G. (1993): Alternating lacustrine-marsh sedimentation and subaerial exposure phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. *Geol. Croatica*, 46, 1, 71-90. Zagreb.
- Velić, J., Weissner, M., Saftić, B., Vrbanac, B. & Ivković, Ž. (2002): Naftogeološke značajke i istraženost triju neogenskih megaciklusa u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. *Nafta*, 53, 6-7, 239-249, Zagreb.
- Velić, J., Malvić, T., Cvetković, M., Weissner, M. & Curi, V. (2008): Observation useful for increase of hydrocarbon fields exploitation period within Croatian part of the Pannonian basin. Proc. SGEM conference "Modern Management of Mine Producing Geology and Environmental Protection". June 2008, SGEM, Albena.
- Vrbanac, B. (1996): Paleostruktura i sedimentološke analize gornjopanonskih sedimenata Ivanić Grad formacije u Savskoj depresiji (s engleskim sažetkom). Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 303 pp., Zagreb.
- Vrbanac B., Velić, J. & Malvić, T. (2010): Sedimentation of deep-water turbidites in main and marginal basins in the SW part of the Pannonian Basin. *Geol. Carpath.*, 61, 1, 55—69, Bratislava.

Napomene

Rad predstavlja rezultate dobivene istraživanjima na:

a) Projektu „Razvoj geomatematičkih metoda za analizu neogenskih taložnih okoliša hrvatskoga dijela Panonskoga bazenskog sustava“ (voditelj T. Malvić), odobrenog od strane Sveučilišta u Zagrebu kroz program „Potpora istraživanjima 2“ tijekom 2013. godine;

b) Projektu MZOŠ-a broj 19519512930237 “Stratigrafska i geomatematička istraživanja naftno-geoloških sustava u Hrvatskoj” (voditeljica J. Velić).

Karte su načinjene licenciranom inačicom programskog paketa *WinGslib™*.